УДК 536.468 + 536.42 + 614.841.22 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-36-51

О вероятностно-физическом и энтропийном подходах к процессам горения и определения пожарной опасности

В. В. Белозеров
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. В статье представлен обзор подходов к решению задачи горения веществ и материалов на предмет их адекватности при определении пожарной опасности изделий и объектов. Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода от латентных форм в определении пожарной опасности материалов и изделий из них (степеней огнестойкости, групп горючести, эффективности огнезащитных покрытий и т. д.) к аналитическим формам, описывающим процессы в теории горения.
Постановка задачи. Определить взаимосвязи теории горения веществ и материалов и существующих методов оценки их пожарной опасности в природных и техногенных системах.
Теоретическая часть. На основе системного анализа решений задач теории горения разработаны вероятностно-физический и энтропийный подходы к решению проблем пожарной безопасности природных и техногенных систем, включая предложения по изменению стандартов, соблюдение которых должно обеспечить защиту от пожаров.
Выводы. Итоги исследования показали необходимость пересмотра эмпирических подходов и латентных форм оценок пожарной опасности веществ, материалов, изделий из них и объектов с помощью термоаналитических и акустических методов и средств.

Ключевые слова: теория горения, пожарная опасность веществ и материалов, вероятность пожара, энтропия, бароэлектротермоакустический анализ, вектор-функция жизненного цикла материалов, пожарная безопасность объектов.

Для цитирования: Белозеров, В. В. О вероятностно-физическом и энтропийном подходах к процессам горения и определения пожарной опасности / В. В. Белозеров // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 4. — С. 36–51. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-36-51

On probabilistic-physical and entropy approaches to combustion processes and determination of fire hazard

V. V. Belozerov
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

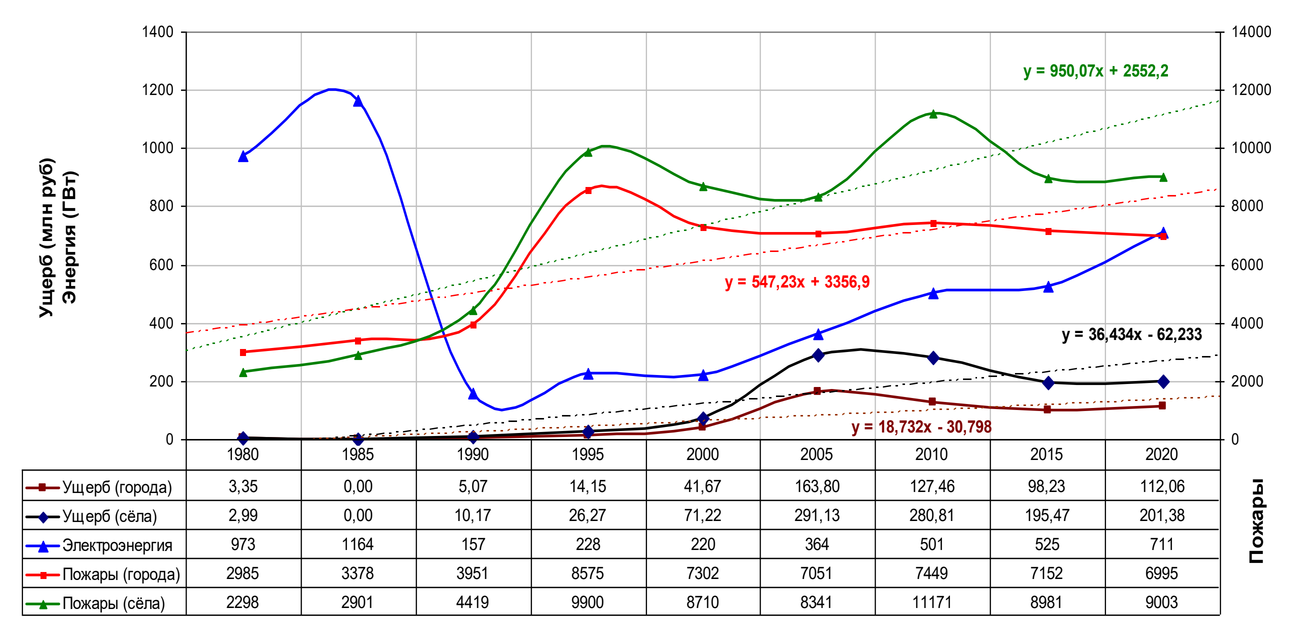
Introduction. The article provides an overview of the existing approaches to solving the problem of combustion of substances and materials, for their adequacy in determining their fire hazard of products and objects. The relevance of the work is due to the need to move from latent forms in determining the fire hazard of materials and products made from them (degrees of fire resistance, flammability groups, groups of the effectiveness of fire retardant coatings, etc.) to analytical forms describing the processes in the combustion theory.
Problem statement. The task of the research is to determine the relationship between the theory of combustion of substances and materials and to assess their fire hazard in natural and man-made systems.
Theoretical part. The system analysis of solutions to the combustion theory problems is performed. Its results became the basis of probabilistic-physical and entropy approaches, as well as proposals for changing standards designed to provide protection from fires.
Conclusions. The results of the study showed the need to revise empirical approaches in assessing the fire hazard of materials and products made from them, which includes using thermoanalytic and acoustic methods and means.

Keywords: combustion theory, fire hazard of substances and materials, probability of fire, entropy, baro-electro-thermo-acoustic analysis, vector-function of the life cycle of materials, fire safety of objects.

For citation: V. V. Belozerov. On probabilistic-physical and entropy approaches to combustion processes and determination of fire hazard. SafetyofTechnogenicandNaturalSystems. 2021; 4: 36–51. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-36-51

Введение. По данным центра пожарной статистики Международной ассоциации пожарных и спасательных служб, в мире ежегодно регистрируется до 4,5 млн пожаров, в которых погибают до 60 тыс. человек. Лидером является США с ежегодным показателем 1,3 млн пожаров. Что касается России, то максимальное значение числа пожаров зафиксировано в 1996 году — почти 300 тыс. [1][1].

По мнению автора представленной работы, такая ситуация возникла и сохраняется потому, что фундаментальная наука, решив однажды основные проблемы горения, не озаботилась прикладными задачами. Их неудовлетворительные решения помимо социально-экономических потерь обусловили устойчивый рост числа пожаров и ущерба от них. Динамика может быть не так очевидна, если ориентироваться только на государственную статистику, которая сравнивает каждый год с предыдущим [1][2]. Более точную картину дает линия тренда. На рис. 1 видно, что она восходящая[3] [2]. Отметим, что данные с конца прошлого века визуализированы и дополнены сведениями о потреблении электроэнергии. Корреляция очевидна. Более того, она доказывает зависимость пожаров и связанных с ними потерь от потребления электроэнергии объектами техносферы, т. е. от изменения удельной «энерговооруженности» населения и объектов.



	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Ущерб (города)	3,35	0,00	5,07	14,15	41,67	163,80	127,46	98,23	112,06
Ущерб (сёла)	2,99	0,00	10,17	26,27	71,22	291,13	280,81	195,47	201,38
Электроэнергия	973	1164	157	228	220	364	501	525	711
Пожары (города)	2985	3378	3951	8575	7302	7051	7449	7152	6995
Пожары (сёла)	2298	2901	4419	9900	8710	8341	11171	8981	9003

Рис. 1. Пожары, ущерб от них и энергопотребление на юге России
(Ростовская область, Краснодарский и Ставропольский края)

При этом главными причинами социальных потерь от пожаров (рис. 2) являются продукты горения (69,36 %) и высокая температура (20,26 %) с сопутствующими факторами (недостаток кислорода — 3,93 % и обострение болезней — 1,79 %)[4] [2].

[1] Пожары и пожарная безопасность / МЧС России // ВНИИПО : [сайт]. URL: http://www.vniipo.ru/institut/informatsionnye-sistemy-reestry-bazy-i-banki-danny/federalnyy-bank-dannykh-pozhary/ (дата обращения: 18.09.2021).
[2] То же.
[3] Белозеров В. В. Автоматизированная система испытаний материалов электротехнической и радиоэлектронной промышленности с контролем их пожарной опасности : дис. … канд. тех. наук. М., 2008. 153 с.
[4] То же.

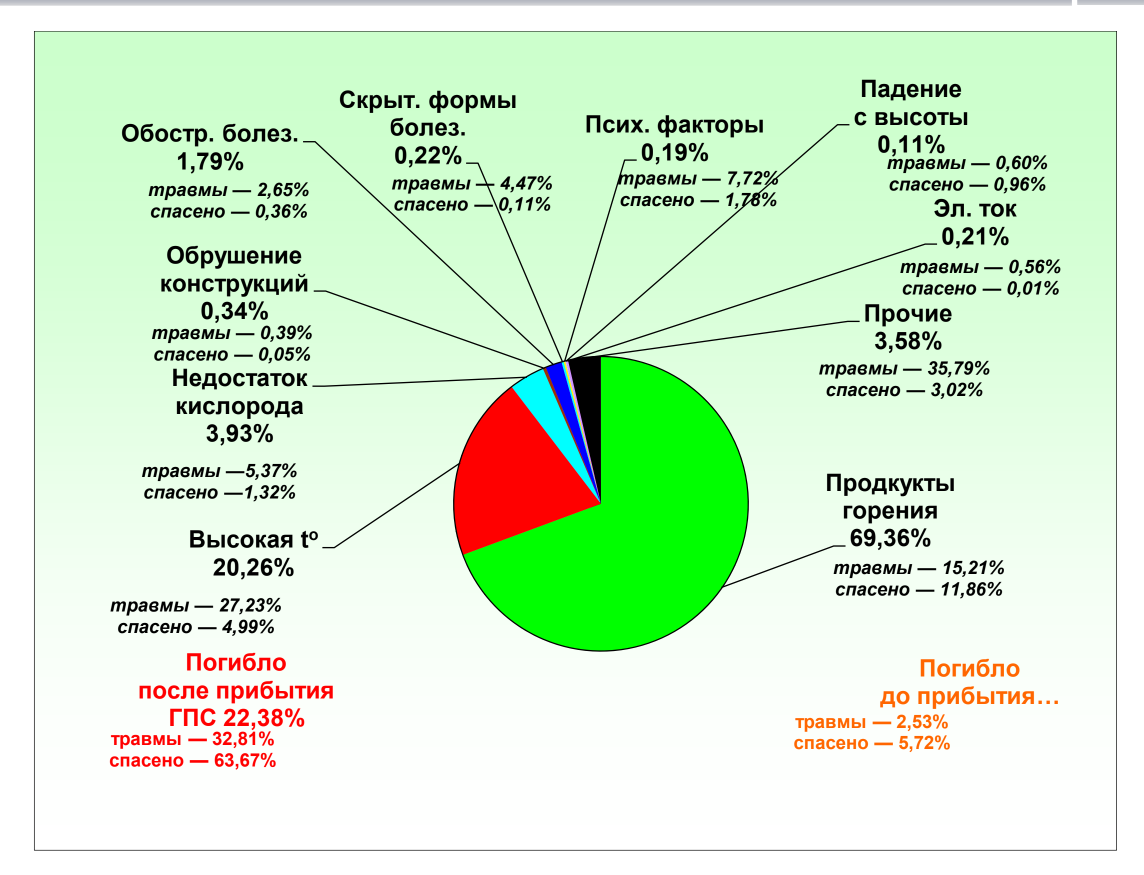


Рис. 2. Статистические данные о причинах гибели и травм при пожарах на юге России
(Ростовская область, Краснодарский и Ставропольский края)

По результатам статистического анализа (рис. 3), основные источники пожаров — приборы и предметы быта (включая электро-, газовые приборы и печи). На них приходится более 70 % инцидентов. Примерно в 26 % случаев речь идет о неосторожном обращении с огнем. 40 % пожаров возникают по электротехническим и газотехническим причинам. С ними связано около 50 % прямых материальных потерь и повреждений площадей[5] [2].

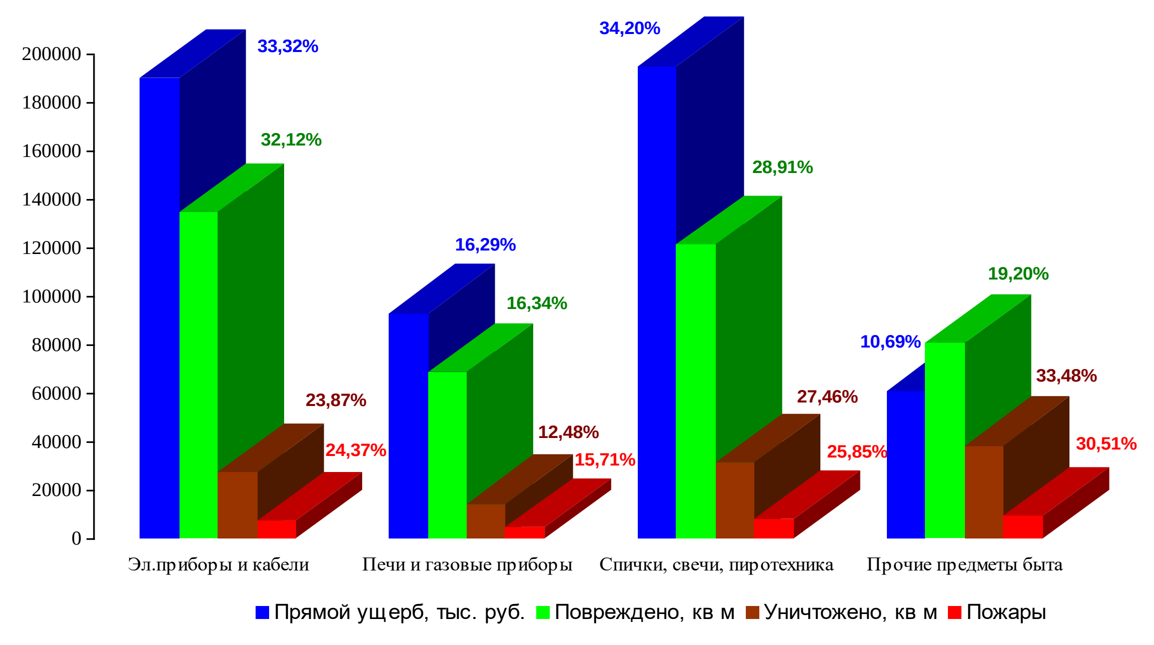


Рис. 3. Статистика по источникам пожаров и потерь от них на юге России
(Ростовская область, Краснодарский и Ставропольский края), доли в % по каждой группе источников

[5] Белозеров В. В. Указ. соч.

Такая ситуация возникла потому, что проработкой вопросов пожарной безопасности занимаются сами пожарные. Например, специалисты этой отрасли создали «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», соответствующие стандарты и нормы [2][6, 7].

Теоретическая часть. Оценка социально-экономических потерь от пожаров по ГОСТ 12.1.004 (вероятность пожаров не выше 10^{-6}, безопасность населения не ниже 0,999999) дает уровень «допустимого» числа ежегодно погибающих на пожарах — не более 146 человек (для 146-миллионного населения России)[8].

Последние 50 лет ежегодные потери в стране от пожаров более чем в 100 раз превышают допустимые. Это доказывает ошибочность методов и средств определения пожарной опасности техногенных и природных систем, а значит, и неадекватность существующих способов и технических средств их противопожарной защиты[9] [2].

Более того, при разработке «Технического регламента о требованиях пожарной безопасности» и «Правил противопожарного режима»[10, 11] МЧС России не стало привлекать фундаментальную науку к решению проблем безопасности. Вместо этого ведомство ввело новые латентные показатели пожарного риска. В отношении этого подхода следует сделать два замечания. Первое. По латентным показателям пожарного риска пока нет удовлетворительного научного теоретического обоснования, несмотря на предпринятые попытки [3]. Второе. Даже спустя 10 лет после нововведений МЧС ситуация практически не изменилась, и это подтверждает статистика[12] [2].

Другой отечественный стандарт — ГОСТ 12.1.044 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов» является копией международных стандартов и давно требует переработки[13]. Документ следует актуализировать в части применения термоаналитических методов (термогравиметрии, дифференциально-сканирующей калориметрии и др.) для определения физико-химических и термодинамических характеристик веществ и материалов. Это позволит отказаться от латентных параметров (групп горючести, степеней огнестойкости, токсичности и др.)[14] [4].

Итак, сокращение потерь от пожаров предполагает учет термодинамических характеристик веществ, материалов и изделий из них в условиях эксплуатации [5]. Кроме того, следует знать особенности технических средств, зданий, сооружений и других объектов в целом, в окружении природных систем [4]. Такой подход позволит исключить возможность возрастания энтропии в каждой из систем и подсистем жизнеобеспечения, включая социальную энтропию, обусловленную человеческим фактором [4, 6].

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что основные проблемы безопасности техногенных и природных систем не решаются потому, что международные и национальные стандарты в этой области устарели и вредны. Используемые ими методы и средства определения пожаровзрывоопасности и горючести веществ и материалов не позволяют адекватно оценивать их опасность, а значит, и опасность изготовленных из них изделий, оборудования, транспортно-энергетических средств и систем, зданий и сооружений[15] [2, 4].

Пока эти основные проблемы не решены. Поэтому разрабатываются и применяются методы и средства противопожарной защиты, которые не адекватны реальной пожарной опасности объектов и не выполняют свои функции, то есть не обеспечивают требуемые ГОСТ 12.1.004 параметры безопасности жизнедеятельности[16].

Уместно отметить, что в головной научно-исследовательской организации МЧС России (ВНИИПО) более 10 лет ведутся исследования пожарной опасности веществ и материалов методами термического анализа[17]. В банке данных — более 3 тысяч веществ и материалов. В 2003 году Беларусь ввела в некоторые свои госстандарты характеристики строительных материалов, определяемые методами и средствами

---

[6] Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ / Государственная дума ; Совет федерации // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/ (дата обращения: 19.09.2021).
[7] Правила противопожарного режима в Российской Федерации : Постановление Правительства РФ от 25.04.2012 № 390 (ред. от 24.12.2018) «О противопожарном режиме» // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129263/ (дата обращения: 19.09.2021).
[8] ГОСТ 12.1.004 Пожарная безопасность. Общие требования. М. : Изд. стандартов, 1992. 77 с.
[9] Белозеров В. В. Указ. соч.
[10] Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
[11] Правила противопожарного режима в Российской Федерации.
[12] Пожары и пожарная безопасность.
[13] ГОСТ 12.1.044 Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М. : Изд-во стандартов, 1990. 143 с.
[14] Белозеров В. В. Указ. соч.
[15] Белозеров В. В. Указ соч.
[16] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью : дис. ... д-ра тех. наук. М., 2013. 422 с.
[17] Молчадский О. И., Смирнов Н. В., Дудеров Н. Г. Оценка теплофизических характеристик и прогноз пожарной опасности строительных материалов с помощью методов термического анализа // Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков : сб. мат-лов XV науч.-практ. конф. Ч. 1. М. : ВНИИПО, 1999. С. 170–172.

термического анализа. В связи с этим можно сделать вывод о перспективном расширении применения термоаналитических приборов и физико-химических параметров материалов вместо косвенных методов и латентных переменных[18, 19].

С точки зрения фундаментальных и прикладных наук, наиболее эффективно исследование веществ и материалов при предельных давлениях и температурах, в вакууме и т. п. Так, например, методы термического анализа: термогравиметрия, термодилатометрия, дифференциально сканирующая калориметрия и другие — позволяют определять многие важные факторы, которые можно разбить на четыре группы. Во-первых, это параметры точек кристаллизации и плавления, сублимации и воспламенения, фазовых переходов. Во-вторых, термодинамические характеристики материалов: теплоемкость, энтальпия, коэффициенты сжатия, расширения и т. п. В-третьих, критерии подобия: коэффициенты теплопроводности и Пуассона, модули Юнга, числа Био и т. д. В-четвертых, некоторые «пожарные» показатели: теплота плавления и сгорания, кислородный индекс и др. Однако из-за трудностей метрологической аттестации установок термического анализа получаемые данные имеют значительные погрешности и применяются, в основном, для качественных оценок[20, 21, 22].

Уже более 40 лет фундаментальная и прикладная наука используют метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации и анализе акустического излучения, возникающего при изменении структуры и физико-химических свойств веществ и материалов. Достоинство АЭ — его неразрушающий характер. Это необходимое условие при исследовании диссипативных процессов, которые характеризуют деградацию параметров и «старение» веществ и материалов, что позволяет прогнозировать изменения их структуры и свойств в условиях эксплуатации [7, 8].

Как показали исследования[23] [8], АЭ дает возможность точно регистрировать некоторые «пожарные» параметры: стадии плавления, пиролиза, воспламенения и горения. С этой целью указанный метод следует использовать синхронно с термогравиметрией и термодилатометрией образца. Однако, имея в виду точность и достоверность результатов, стоит отметить, что для приборов и установок АЭ характерны те же метрологические трудности, что и для приборов термического анализа [7, 8].

Следовательно, при изучении веществ и материалов в реальных условиях эксплуатации целесообразно задействовать вероятностно-физический подход, а также термодинамическую интерпретацию деградационных процессов. Это наиболее перспективное направление, в том числе с точки зрения объективации параметров пожарной опасности [4–6][24].

До настоящего времени в фундаментальной и прикладной науке приняты несколько подходов к определению условий загорания (самовоспламенения и зажигания) веществ и материалов.

Первый разработан нобелевским лауреатом академиком Н. Н. Семеновым. Это основоположник теории горения, предложивший считать источники тепловыделения аррениусовскими, а теплоотвод — ньютоновским при условии одинаковой температуры по всей реагирующей массе [9]:

$$\frac{E_a}{RT_s^2}\cdot\frac{QV}{\alpha F}\cdot k\cdot\exp\left(-\frac{E_a}{RT_s}\right)\geq\frac{1}{e}, \tag{1}$$

где E_a — энергия активации, *Дж·моль*$^{-1}$; R — газовая постоянная, 8,3 *Дж·моль*$^{-1}$ *К*$^{-1}$; Q — тепловой эффект реакции, *Дж·моль*$^{-1}$; α — коэффициент теплоотдачи, *Вт·м*$^{-2}$*·К*$^{-1}$; F — площадь поверхности, *м*^{2}; V — объем материала, *м*^{3}; k — предэкспонент; e — основание натуральных логарифмов; T — температура самовоспламенения вещества (горючей смеси), *К*.

---

[18] СТБ 1333.0-2002. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимеров / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь // studmed.ru : [сайт]. URL: https://www.studmed.ru/stb-1333-0-2002-izdeliya-polimernye-dlya-stroitelstva-metod-opredeleniya-dolgovechnosti-po-energii-aktivacii-termookislitelnoy-destrukcii-polimernyh-materialov_4ecedd28114.html (дата обращения: 20.09.2021).

[19] СТБ 1333.2-2002. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности труб полимерных для инженерно-технических систем / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь // БелГИСС : [сайт]. URL: https://shop.belgiss.by/ru/gosudarstvennye-standarty/stb-1333-2-2002 (дата обращения: 14.09.2021).

[20] Белозеров В. В. Автоматизированная система испытаний материалов электротехнической и радиоэлектронной промышленности с контролем их пожарной опасности.

[21] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.

[22] Приборы термического анализа / NETZSCH // netzsch-thermal-analysis.com : [сайт]. URL: http://www.netzsch-thermal-analysis.com/ru/produkte/ (дата обращения: 22.09.2021).

[23] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.

[24] То же.

Альтернативой критерию Семенова (1/e) стал подход, разработанный во ВНИИ противопожарной обороны. Температуру самовоспламенения T связали степенной функцией с площадью поверхности материала F и его объемом V [10]:

$$T_{ign} = A_p \cdot \left(\frac{F}{V}\right)^{n_p} \quad (2)$$

Здесь A_p—эмпирический коэффициент; $n_p = \frac{E_a/RT_A}{(E_a/RT_A+1)}$ — показатель степенной функции, где T_A — температура окружающей среды. Остальные обозначения — те же.

Недостаток обоих методов: при определении условий самовоспламенения веществ и материалов не принималась во внимание неоднородность нагрева реагирующей массы. Остальные недостатки и ошибки касаются точности и достоверности определения параметров. Они перечислены ниже[25,26] [10].

— Критерий Семенова (1/e) не должен принимать значение, обратное основанию натуральных логарифмов. Его следует рассчитывать, например, как отношение производных скоростей тепловыделения.

— Температура в формуле ВНИИПО должна выражаться в градусах Кельвина, чтобы не приводить к ложным результатам при стремлении температуры к нулю по шкале Цельсия.

Эти недостатки преодолел Д. А. Франк-Каменецкий, аналитически решив стационарную задачу теплового самовоспламенения [11]:

$$\frac{E}{RT_O^2} \cdot \frac{Q\ell^2}{\lambda} \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_O}\right) \geq \delta_{КР} \quad (3)$$

где, $\delta_{КР}$ — безразмерный критерий Франк-Каменецкого; λ — коэффициент теплопроводности материала, Вт·м^{1}·К$^{-1}$; r— определяющий размер материала (горючей среды), м. Остальные обозначения переменных приводились выше.

Критерий рассчитан Д. А. Франк-Каменецким при условии неограниченной теплоотдачи для трех основных геометрических форм: цилиндра (2,00), шара (3,32) и плоскости (0,88). В дальнейшем под руководством А. Г. Мержанова была найдена такая зависимость и для естественного теплообмена [12]:

$$\delta_* = \frac{8a_*^2}{\left(a_*^2+1\right)^2} \cdot \exp\left\{\frac{-4a_*^2}{\left(a_*^2+1\right)Bi}\right\} \quad a_* = \sqrt{\sqrt{\frac{4}{Bi^2}+1}-\frac{2}{Bi}} \quad (4)$$

где $Bi = \alpha \cdot \ell/\lambda$ — число Био (в т. ч. радиационное: $Bi_p = \sigma \cdot T^3 \cdot \ell/\lambda$).

Однако из-за аппроксимации экспоненты Аррениуса рядом Франк-Каменецкого его методу присущи следующие недостатки[27], [28] [10]:

— математическая сложность и практическое неудобство использования безразмерных параметров;

— некорректное допущение о нелинейности теплоотвода от образца с внутренними источниками теплоты, и как результат — несогласованность с критическим условием теплового самовоспламенения по диаграмме Семенова.

Указанные недостатки устранил метод Я. С. Киселева. Он ввел в уравнение Семенова названный в честь него критерий — отношение производных скоростей тепловыделения, а также предэкспонент объемной скорости реакции и критерий неравномерности нагрева [10]:

$$\frac{E}{RT^2} \cdot \frac{QZ}{\rho \cdot c_P} \cdot exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \geq \frac{\psi \cdot Se \cdot \alpha \cdot F}{\rho \cdot c_P \cdot V}, \quad (5)$$

где E — энергия активации, Дж·моль$^{-1}$; R — газовая постоянная, 8,3 Дж·моль$^{-1}$ К$^{-1}$; Q — тепловой эффект реакции, Дж·моль$^{-1}$; c_P— удельная теплоемкость Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$; ρ — плотность материала, кг·м$^{-3}$; α — коэффициент теплоотдачи, Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$; F — площадь поверхности, м^2; V — объем материала, м^3; $Q{\cdot}Z/\rho{\cdot}C_P$ — предэкспонент объемной скорости реакции, моль·м$^{-3}$·с$^{-1}$; T — температура самовоспламенения вещества (горючей среды) и окружающей среды, К; $T_0 = T — RT^2/E$ (соотношение Тодеса) — температура окружающей среды, К; $\psi = \frac{n \cdot \lambda}{\alpha \cdot \ell + n \cdot \lambda}$ — критерий Киселева, где относительный градиент nдля плоскости, неограниченного цилиндра, сферы, куба и конечного цилиндра равен 2,38; 2,71; 3,01; 2,29 и 2,50 соответственно.

---

[25] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[26] Белозеров В. В. О целесообразности пересмотра основных «пожарных» стандартов.
[27] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[28] Белозеров В. В. О целесообразности пересмотра основных «пожарных» стандартов.

Разработанный Я. С. Киселевым подход, который основан на анализе тепловых потоков, также имеет ряд недостатков. В частности, введенный в нем относительный градиент пока не имеет функции вычисления. В то же время преимущество его очевидно, т. к. формулы Семенова, Франк-Каменецкого и Таубкина (ВНИИПО) являются частными решениями его уравнения (5).

Второй подход, описывающий зажигание (в частности, зажигание плоской стенкой), разработал академик Я. Б. Зельдович. Он определил критическую плотность теплового потока и вывел для размерной величины теплового потока следующее уравнение [13]:

$$q = \sqrt{2\lambda \frac{RT_S^2}{E} \cdot Q \cdot k \cdot exp\left(-\frac{E}{RT_S}\right)}. \quad (6)$$

Здесь q — критическая плотность теплового потока, Вт/м^2; T_S— температура стенки, ºK; λ — коэффициент теплопроводности газовой фазы. Остальные обозначения переменных приводятся выше.

Другой критерий зажигания конденсированных веществ, нагретых тепловым импульсом, предложили член-корреспондент АН СССР А. А. Ковальский и академик А. Г. Мержанов [14, 15]:

$$\frac{1}{\alpha} ln F(\gamma) \cdot q \cdot K_0\, exp\left(-\frac{E}{RT_m}\right) = \frac{\lambda \cdot \alpha \cdot \Delta T_m}{F(\gamma)} \text{ при } F(\gamma) = \frac{1 + RT_m / E}{1 - RT_m \cdot T_0 / \Delta T_m} \quad (7)$$

Здесь T_m— температура зажигания, T_0 — температура образца. Остальные обозначения переменных приводятся выше.

И. С. Любченко и член-корреспондент АН Республики Татарстан Г. Н. Марченко предложили асимптотический критерий зажигания реагирующих конденсированных веществ [16]:

$$q = 1,39\sqrt{\sqrt{\left(\frac{E(T_S - T_O)}{RT^2}\right)} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho \cdot Q \cdot K \cdot RT^2}{E} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (8)$$

Здесь T_S — температура стенки, T_o — температура образца Остальные обозначения переменных приводятся выше.

С учетом стационарного теплоотвода из зоны реакции критическое уравнение плотности теплового потока (в т. ч. для невырожденного режима зажигания с несимметричным нагревом) уточняет формулу Зельдовича [13, 17]:

$$q^2 = 2\lambda \cdot \rho \cdot \frac{RT_S^2}{E} \cdot Q \cdot K \cdot exp\left(-\frac{E}{RT_S}\right) \quad (9)$$

Все указанные подходы достаточно хорошо описывают частные случаи загораний. Однако они, во-первых, не позволяют прогнозировать возникновение пожаров в реальных условиях эксплуатации промышленных и жилых объектов. Во-вторых, нахождение энергий активации, входящих в приведенные выше уравнения, представляет сложную экспериментальную задачу для любого материала. Проблема обусловлена тем, что приборные методы и средства не позволяют создать изотермические условия и с необходимой точностью и достоверностью зафиксировать параметры стадий плавления, тления и воспламенения веществ и материалов[29,30].

Третий подход, интегрирующий все предыдущие, был разработан ростовскими учеными совместно с сотрудниками Академии ГПС МЧС России[31,32,33,34] [4, 7].Он позволил преодолеть указанные методические и инструментальные трудности, а главное — связать параметры процессов воспламенения и горения[35] с вероятностью возникновения пожара[36].

---

29 Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
30 Молчадский О. И., Смирнов Н. В., Дудеров Н. Г. Указ. соч.
31 Белозеров, В. В. Автоматизированная система испытаний материалов электротехнической и радиоэлектронной промышленности с контролем их пожарной опасности.
32 Способ синхронно-сопряженного термического анализа веществ и материалов и установка для его осуществления : патент 2343467 Рос. Федерация : МПК G01N 27/00 / В. В. Белозеров, В. В. Белозеров, С. И. Босый [и др.]. № 2006125486/28 ; заявл. 17.07.2006 ; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1. 26 с.
33 Белозеров В. В. О целесообразности пересмотра основных «пожарных» стандартов.
34 Способ термодинамического акустикоэмиссионного эталонирования и система его реализующая : патент 2399910 Рос. Федерация : G01N 25/02, G01N 29/14 / В. В. Белозеров, С. И. Босый, С. И. Буйло. № 2399910 ; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26.
35 ГОСТ 12.1.044 Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
36 ГОСТ 12.1.004 Пожарная безопасность. Общие требования.

Предложенный метод бароэлектротермоакустометрии (БЭТА) и БЭТА-анализатор, его реализующий, позволяют определить многопараметрическую вектор-функцию жизненного цикла (ВФЖЦ) образца любого материала —F [P, T, m_i, ℓ_i, ρ_i, λ_i, a_i, Cp_i, Cv_i, β_i, γ_i, ζ_i, h_i, χ_i, ψ_i, H_i, Fo_i, B_i, E_i, K_i, G_i, ν_i, $\rho_i g\cdot\ell_i/E_i$, σ_i,$|Z_i|$, $C_i(R_i)$, $tg\sigma_i$, ε_i, μ_i, $\mu_i\cdot\ell_i 2/\sigma_i t$, $L_i/R_i t$,$\varepsilon_i\cdot\sigma_i/t$,$C_i/\sigma_i t$,$Na_i$,$U_i$,$G_i$,$\eta_i$). Изменения ВФЖЦ свертываются в функцию производства энтропии без потери данных об обратимых и необратимых процессах вплоть до разрушения или воспламенения и горения образца[37,38,39] [18]. В отличие от предыдущих способов решения предложено свести в систему уравнений (10) неравенства Семенова и Зельдовича с уравнениями Франц-Каменецкого и Любченко — Марченко, чтобы с помощью БЭТА-анализатора найти решение в точке воспламенения образца, регистрируемого сигналами акустической эмиссии, с учетом конструкции (рис. 4) тигля термоэлектродилатометра (ТЭД) и допущений, которые приводятся после экспликации[40,41]:

$$\begin{cases} Se = \dfrac{Q\cdot V}{F\cdot\alpha}\cdot\dfrac{E_a\,K_{Se}}{RT_{ПО}^2}\cdot\exp\left(-\dfrac{E_a}{RT_{ПО}}\right) \\ q = \sqrt{\dfrac{2\lambda_B RT_{ПО}^2\cdot Q\cdot K_{Ze}}{E_a}\cdot\exp\left(-\dfrac{E_a}{RT_{ПО}}\right)} \\ F_к = \dfrac{Q\cdot r^2}{\lambda_O}\cdot\dfrac{E_a}{RT_O^2}\cdot K_{Fk}\cdot\exp\left(-\dfrac{E_a}{RT_O}\right) \\ q^2 = \dfrac{2\lambda_O\rho\cdot Q\cdot K_{Lu}\cdot RT_{ПО}^2}{E_a}\cdot\exp\left(-\dfrac{E_a}{RT_{ПО}}\right) \end{cases} \quad (10)$$

Здесь q — критическая плотность теплового потока; λ_B — коэффициент теплопроводности газовой фазы (воздуха); λ_O — коэффициент теплопроводности образца; ρ — плотность образца; R — газовая постоянная; E_a— энергия активации процессов в образце; Q — тепловой эффект реакции; Ki — предэкспоненты; Se— критерий Семенова (Se = 0,368); V — текущий объем образца; F — текущая площадь поверхности образца; α — текущий коэффициент теплоотдачи образца; $T_{ПО}$— температура поверхности образца; $Fк$ — критерий Франк-Каменецкого ($Fк$ = 2,00); r— характерный размер образца; $To = T_{ПО}$–$(T_{ПО} – T_H)/2$ — средняя температура образца.

Приведем допущения, которые упоминались выше.

— Исследуемые образцы изготавливаются в виде цилиндра (вязкие и жидкие наливаются в тонкий молибденовый «стакан») и помещаются в тигель — термоэлектродилатометр (ТЭД). Он оснащен подвижным «поплавком» и двумя неподвижными термодатчиками (рис. 4). Температура дна Tb и температура крышки Tc равны температуре печи. Температура поверхности образца — Ts. Среднеобъемное значение температуры образца: $TV = (T_b – Ts)/2$.

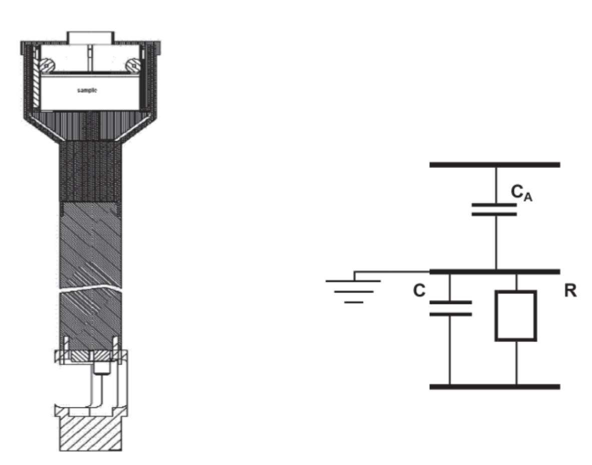


Рис. 4. Тигель-термоэлектродилатометр для твердых, жидких и вязких материалов и его эквивалентная схема

[37] Белозеров В. В. Автоматизированная система испытаний материалов электротехнической и радиоэлектронной промышленности с контролем их пожарной опасности.
[38] Способ синхронно-сопряженного термического анализа веществ и материалов и установка для его осуществления.
[39] Совмещенный термогравиметрический и акустикоэмиссионный способ определения стадий термодеструкции веществ и материалов и устройство для его осуществления : патент 2324923 Рос. Федерация : RU 2006 126 287 A / В. В. Белозеров, С. И. Буйло, Ю. В. Прус. № 2006126287/28 ; заявл. 19.07.2006 ; опубл. 27.01.2008, Бюл. № 3. 1 с.
[40] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[41] Белозеров В. В. О целесообразности пересмотра основных «пожарных» стандартов.

— Стадии термодеструкции и момент воспламенения фиксируются с помощью двух датчиков АЭ, установленных на внешних концах молибденовых термоакустических шток-волноводов (ТАШВ). Два их полуконуса вставлены в дно ТЭД и контактируют с испытываемым образцом.

— Тигель — ТЭД (см. рис. 4) изготавливается из циркониевой керамики. Коэффициент его теплопроводности — около 1,0 Вт/(м•К). Молибденовые обкладки (дно, крышка и подвижный «поплавок») имеют коэффициент теплопроводности около 130 Вт/(м•К) и позволяют создать однонаправленный регулируемый тепловой поток в образец с определяемой плотностью q (Вт/м^2) и боковым рассеянием тепла менее 1 %.

Эти допущения, по мнению автора, корректны, если учесть, что в уравнении Семенова используется коэффициент теплоотдачи от поверхности образца [9], в уравнениях Франк-Каменецкого и Любченко — Марченко — коэффициент теплопроводности образца [11, 12], а в уравнении Зельдовича — коэффициент теплопроводности газовой фазы от «стенки» до образца (в данной схеме измерения — до поплавка). То есть температура зажигающей стенки — это температура поплавка на поверхности образца[42] [13].

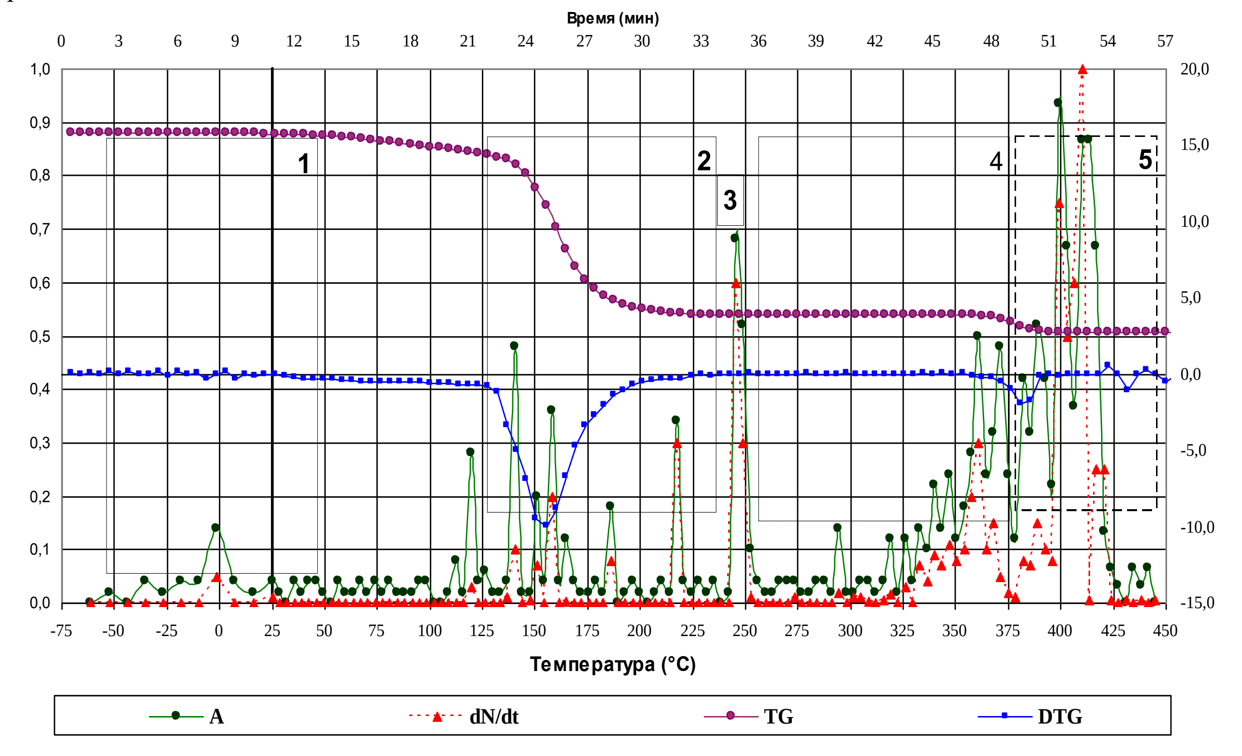


Рис. 5. Термогравиакустометрия полимера: 1 — зона термодеструкции образца при эксплуатации (от –50 °C до +50 °C); 2 — зона пиролиза образца; 3 — точка воспламенения образца; 4 — зона горения образца; 5 — зона формирования коксового остатка. По левой шкале показаны нормированные амплитуда и интенсивность акустической эмиссии, по правой — изменение массы образца в граммах

При термоциклировании (нагревании — охлаждении) образца можно зарегистрировать и вычислить термокинетические параметры (E_{Di} и QK_{Di}) стадий его термодеструкции: кристаллизации, возникновения каналов протекания (см. рис. 5). Все это достоверно регистрируется сигналами АЭ. По названным стадиям можно построить вектор-функции жизненного цикла (ВФЖЦ) образца, включая процессы старения при эксплуатации[43,44,45,46] [18].

Высокая точность параметров ВФЖЦ обеспечивается динамической метрологией измерительных каналов бета-анализатора с помощью встроенных в ТЭД термодинамических акустико-эмиссионных эталонов. Эти эталоны, представляющие собой «капельки» ртути и воды, запаяны в ТАШВ, образующие «дно ТЭД».

[42] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[43] Белозеров В. В. Автоматизированная система испытаний материалов электротехнической и радиоэлектронной промышленности с контролем их пожарной опасности.
[44] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[45] Способ синхронно-сопряженного термического анализа веществ и материалов и установка для его осуществления.
[46] Совмещенный термогравиметрический и акустикоэмиссионный способ определения стадий термодеструкции веществ и материалов и устройство для его осуществления.

Благодаря безгистерезисным характеристикам фазовых переходов I рода, они позволяют калибровать измерительные каналы в ходе испытаний. Метод такого эталонирования защищен патентом РФ[47].

Учтем начальную калибровку образца в ТЭД перед испытаниями при нормальных условиях: точное определение массы — m, линейного размера — ℓ, вычисление плотности — ρ, объема — V, радиуса образца —r и коэффициента $\psi = r/\ell$). В этом случае для решения системы (10) в ее уравнения подставляются следующие измеряемые ТЭД параметры и используются следующие формулы:

— текущий радиус образца (характерный размер) r → (м) $r = \psi\cdot\ell(T)$;

— текущий коэффициент теплопроводности образца → (Вт/м·°К) $\lambda_O(T)$;

— текущий коэффициент теплоотдачи образца → (Вт/м^2·°К)$\alpha = Bi\cdot\lambda_O(T)/\ell(T)$, где число Био находится по формуле $Bi = \sigma T^3\ell(T)/\lambda_O(T)$;

— текущий объем образца → (м^3) $V(T) = \pi\cdot\psi^2\cdot\ell^3(T)$;

— текущая площадь поверхности образца (цилиндра) → (м^2) $F(T) = 2\pi\cdot\psi^2\cdot\ell^2(T) + 2\pi\cdot\psi\cdot\ell^2(T) = 2\pi\cdot\psi\cdot\ell^2(T)\cdot(\psi+1)$.

В последнем случае учитывается начальная калибровка образца в ТЭД перед испытаниями при нормальных условиях (точное определение массы m, линейного размера ℓ, а также вычисление плотности ρ, объема V, радиуса образца r и коэффициента $\psi = r/\ell$).

Система (10) решается подстановкой в несколько этапов. Этим она отличается от прежних методов[48,49] с учетом результатов анализа размерности переменных в уравнениях.

1-й шаг. Делением второго уравнения на третье ($Se/F\kappa$) с подстановкой измеренных в точке воспламенения значений всех переменных определяется энергия активации воспламенения E_a:

$$\frac{Se}{F_K}=\frac{\lambda_O RT_O^2\cdot Q\cdot V\cdot E_a\cdot K\exp\left(-\frac{E_a}{RT_{ПО}}\right)}{r^2 Q\cdot E_a K\exp\left(-\frac{E_a}{RT_O}\right)RT_{ПО}^2\cdot F\cdot\alpha\cdot}=\frac{T_O^2\exp\left(\frac{E_a}{RT_O}\right)}{2\psi\ (\psi+1)\cdot T_{ПО}^2\cdot\mathrm{Bi}\cdot\exp\left(\frac{E_a}{RT_{ПО}}\right)}.=\frac{T_O^2}{2\psi(\psi+1)\cdot T_{ПО}^2\cdot\cdot\mathrm{Bi}}\exp\left(\frac{E_a}{RT_O}-\frac{E_a}{RT_{ПО}}\right)$$

Подставим критерии Семенова и Франк-Каменецкого (для образца-цилиндра) и логарифмируем:

$$E_a\left(\frac{T_{ПО}-T_O}{RT_OT_{ПО}}\right)=\ln\frac{F_K\cdot T_O^2}{2Se\cdot\psi(\psi+1)\cdot T_{ПО}^2\cdot\mathrm{Bi}}\rightarrow E_a=\frac{RT_OT_{ПО}}{T_{ПО}-T_O}\cdot\ln\frac{e\cdot T_O^2}{\psi(\psi+1)\cdot T_{ПО}^2\cdot\mathrm{Bi}}. \tag{11}$$

2-й шаг. Подставим (11) в уравнения системы (10) и определим термокинетические комплексы QKi:

$$Se=\frac{Q\cdot\pi\cdot\psi^2\cdot\ell^3\cdot\frac{RT_OT_{ПО}}{T_{ПО}-T_O}\cdot\ln\frac{e\cdot T_O^2}{\psi(\psi+1)\cdot T_{ПО}^2\cdot\mathrm{Bi}}\cdot K_{Se}}{2\pi\cdot\psi\cdot\ell^2(\psi+1)\cdot\frac{Bi\cdot\lambda_O}{\ell}\cdot RT_{ПО}^2}\cdot\exp\left(-\frac{\frac{RT_OT_{ПО}}{T_{ПО}-T_O}\cdot\ln\frac{e\cdot T_O^2}{\psi(\psi+1)\cdot T_{ПО}^2\cdot\mathrm{Bi}}}{RT_{ПО}}\right)\rightarrow$$

$$QK_{Se}=\frac{2(\psi+1)\cdot Bi\cdot\lambda_O\cdot T_{ПО}(T_{ПО}-T_O)}{e\cdot\psi\cdot\ell^2\cdot T_O\cdot\ln\frac{e\cdot T_O^2}{\psi(\psi+1)\cdot T_{ПО}^2\cdot\mathrm{Bi}}}\cdot\exp\left(\frac{T_O}{T_{ПО}-T_O}\cdot\ln\frac{e\cdot T_O^2}{\psi(\psi+1)\cdot T_{ПО}^2\cdot\mathrm{Bi}}\right) \tag{12}$$

[47] Способ термодинамического акустикоэмиссионного эталонирования и система его реализующая.
[48] Белозеров В. В. Автоматизированная система испытаний материалов электротехнической и радиоэлектронной промышленности с контролем их пожарной опасности.
[49] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.

$$q^2 = \frac{2\lambda_B RT_{ПО}^2 \cdot Q \cdot K_{Ze}}{\frac{RT_O T_{ПD}}{T_{ПD} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}} \cdot \exp\left(-\frac{\frac{RT_O T_{ПD}}{T_{ПD} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}}{RT_{ПО}} \right) \rightarrow$$

$$QK_{Ze} = \frac{q^2 T_O \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot Bi}}{2\lambda_B T_{ПО}(T_{ПО} - T_O)} \exp\left(\frac{T_O}{(T_{ПО} - T_O)} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot Bi} \right) \tag{13}$$

$$F_к = \frac{Q \cdot K_{Fk} \cdot \psi^2 \ell^2 \frac{RT_O T_{ПD}}{T_{ПD} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}}{\lambda_O RT_O^2} \cdot \exp\left(-\frac{\frac{RT_O T_{ПD}}{T_{ПD} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}}{RT_O} \right) \rightarrow$$

$$QK_{Fk} = \frac{2\lambda_O T_O (T_{ПО} - T_O)}{\psi^2 \ell^2 T_{ПD} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}} \exp\left(\frac{T_{ПD}}{T_{ПD} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}} \right) \tag{14}$$

$$q^2 = \frac{2\lambda_O \rho \cdot RT_{ПО}^2 \cdot Q \cdot K_{Le}}{\frac{RT_O T_{ПD}}{T_{ПD} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}} \cdot \exp\left(-\frac{\frac{RT_O T_{ПD}}{T_{ПD} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}}{RT_{ПО}} \right) \rightarrow$$

$$QK_{Le} = \frac{q^2 T_O \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot Bi}}{2\lambda_O \rho \cdot T_{ПО}(T_{ПО} - T_O)} \exp\left(\frac{T_O}{(T_{ПО} - T_O)} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot Bi} \right) \tag{15}$$

Формулы (11–15) позволяют регистрировать и вычислять термокинетические параметры (E_{Di} и QK_Di) всех стадий термодеструкции образцов.

Исследования[50,51,52,53,54] [18] показали, что до начала убывания массы образца в результате процессов термодеструкции (т. е. до регистрации изменения m_0) тепловая энергия, которую получает образец, расходуется на:

— изменение его структуры и температуры, т. е. на нагрев и фазовые переходы (пороги протекания, плавление и т. д.), что регистрируется сигналами акустической эмиссии (рис. 5);

— взаимодействие (теплообмен и излучение) с окружающей средой.

Следовательно, можно утверждать, что энергия активации в точке воспламенения E_a — это энергия связи E_b, т. е. можно воспользоваться следующими равенствами [19]:

$$E_b = ST = \Delta mc^2, \tag{16}$$

$$E = E_о + E_b + A = m_о c^2 + \Delta mc^2 + A. \tag{17}$$

Здесь E_b — энергия, расходуемая на образование новых внутренних связей, включая изменение массы и объема образца; S— энтропия, характеризующая изменения массы (структуры) образца; T — абсолютная температура, характеризующая в данном случае скорость процессов в объекте; Δm — изменение массы объекта; c — скорость света; E — полная энергия рассматриваемого объекта; $E_о$— собственная внутренняя энергия; A — энергия, затрачиваемая на совершение внешней работы (свободная энергия); $m_о$— масса объекта.

[50] Белозеров В. В. Автоматизированная система испытаний материалов электротехнической и радиоэлектронной промышленности с контролем их пожарной опасности.
[51] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[52] Способ синхронно-сопряженного термического анализа веществ и материалов и установка для его осуществления.
[53] Совмещенный термогравиметрический и акустикоэмиссионный способ определения стадий термодеструкции веществ и материалов и устройство для его осуществления.
[54] Способ термодинамического акустикоэмиссионного эталонирования и система его реализующая.

В таком случае уравнение энергии активации (11) можно записать в следующем виде[55]:

$$E_a = ST_O = \frac{RT_O T_{ID}}{T_{ID} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}} \tag{18}$$

Отсюда получим формулу для расчета энтропии диссипации (активации):

$$S = \frac{RT_{ID}}{T_{ID} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}} \tag{19}$$

Подставим в (10) выражения (18 и 19) и запишем новую систему (20). Она позволит получать на всех стадиях жизненного цикла термокинетические комплексы (QK_{Di}) образцов (21)–(24), для последующего вычисления через разность между стадиями — функций производства энтропии (ΔSi), которые характеризуют деградацию свойств:

$$\begin{cases} Se = \dfrac{Q \cdot V \cdot S \cdot K_{Se}}{F \cdot \alpha \cdot RT_{ПО}} \cdot exp\left(-\dfrac{S}{R}\right); \\ q = \sqrt{\dfrac{2\lambda_B RT_{ПО} \cdot Q \cdot K_{Ze}}{S} \cdot exp\left(-\dfrac{S}{R}\right)}; \\ F_к = \dfrac{Q \cdot \psi^2 \ell^2 S \cdot K_{Fk}}{\lambda_O RT_O} \cdot exp\left(-\dfrac{S}{R}\right); \\ q^2 = \dfrac{2\lambda_O \rho \cdot Q \cdot K_{Lu} \cdot RT_{ПО}}{S} \cdot exp\left(-\dfrac{S}{R}\right). \end{cases} \tag{20}$$

$$QK_{Se} = \frac{2(\psi+1)Bi \cdot \lambda_O \cdot T_{ПО}(T_{ID} - T_O)}{e \cdot \psi \cdot \ell^2 \cdot \ln \dfrac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}} \cdot \exp\left(\frac{T_O}{T_{ID} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}\right) \tag{21}$$

$$QK_{Ze} = \frac{q^2 T_O \cdot \ln \dfrac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot Bi}}{2\lambda_B T_{ПО}(T_{ПО} - T_O)} \exp\left(\frac{T_O}{T_{ID} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}\right) \tag{22}$$

$$QK_{Fk} = \frac{2\lambda_O T_O (T_{ПО} - T_O)}{\psi^2 \ell^2 T_{ID} \cdot \ln \dfrac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}} \exp\left(\frac{T_{ID}}{T_{ID} - T_O} \cdot \ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot \mathrm{Bi}}\right) \tag{23}$$

$$QK_{Le} = \frac{q^2 \cdot ln \dfrac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot Bi}}{2\lambda_O \rho \cdot T_{ПО}(T_{ПО} - T_O)} exp\left(\frac{T_O}{(T_{ПО} - T_O)} \cdot ln \frac{e \cdot T_O^2}{\psi(\psi+1) \cdot T_{ПО}^2 \cdot Bi}\right) \tag{24}$$

Это демонстрирует возможность реализации аналитического, количественного подхода к пожарной опасности материалов. Очевидна необходимость заменить методы и средства их определения. Вместо ГОСТ 12.1.044 следует ввести его новую редакцию, которая задействует методы и средства бароэлектротермоакустического бета-анализа, которые разработаны в России[56,57,58,59,60] [18].

В этом случае, с точки зрения дальнейшего взаимодействия указанных основных стандартов, безусловно, следует откорректировать ГОСТ 12.1.004. Необходимо устранить ошибки в размерности событий и

---

[55] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[56] Белозеров В. В. Автоматизированная система испытаний материалов электротехнической и радиоэлектронной промышленности с контролем их пожарной опасности.
[57] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[58] Способ синхронно-сопряженного термического анализа веществ и материалов и установка для его осуществления.
[59] Совмещенный термогравиметрический и акустикоэмиссионный способ определения стадий термодеструкции веществ и материалов и устройство для его осуществления.
[60] Способ термодинамического акустикоэмиссионного эталонирования и система его реализующая.

в методике «внесения неисправностей в электроприборы». Остановимся подробнее на слабых местах этого документа[61,62,63].

Во-первых, вероятность любого события является безразмерной величиной. Однако ГОСТ 12.1.004 (как и «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности») фиксирует допустимый уровень вероятности пожара в оборудовании или объекте (в «Техническом регламенте» речь идет о пожарном риске) 10^{-6} в год. С точки зрения теорий надежности и вероятностей, это интенсивность события λ с общепринятой размерностью 1/час. Иными словами, 1,14·10 – 10 час$^{-1}$, т. к. приходится одну миллионную разделить на 8760 часов, из которых состоит год[64].

Во-вторых, для испытаний пожарной опасности радиоэлектронного и электротехнического оборудования и приборов используется зафиксированная в указанных документах методология внесения неисправностей. Ее необходимо исключить. Дело в том, что данный ошибочный подход требует применения сложного раздела теории надежности — теории зависимых отказов. Искусственное «выключение», т. е. замыкание или обрыв какого-либо ЭРЭ изделия активирует аварийный режим не в нем, а в схемотехнически связанных других электрорадиоэлементах. Это обусловливает некорректность дальнейшего расчета вероятности пожара, т. к. нарушаются условия применимости формул распределения вероятностей, требующих независимости событий[65,66,67].

Первую ошибку можно устранить, введя понятие «пожаробезопасный ресурс» (материала, изделия и т. д.) и требования его соизмеримости с техническим ресурсом, т. е. со сроком эксплуатации материала, оборудования, помещения и объекта. Корректной формулировкой будет: «Вероятность пожара в оборудовании или объекте не должна превышать 10^{-6} в течение срока его эксплуатации». Покажем, как в этом случае (например, с учетом общепринятого в ГОСТ Р 27.403 экспоненциального распределения) определяется допустимая интенсивность λ_A при создании (проектировании и производстве) изделия (объекта). Зная время расходования «пожаробезопасного ресурса» при эксплуатации (t_{FR}), логарифмируем функцию распределения:

$$10^{-6} = 1 - \exp(-\lambda_A t_{FR}) \rightarrow \quad \lambda_A = \left(\frac{\ln(1) - \ln(1 - 10^{-6})}{t_{FR}} \right) \tag{25}$$

Уместно напомнить, что Федеральный закон 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»[68] ввел понятие «пожарный риск». По мнению автора, это, во-первых, ничем не обосновано. Во-вторых, вносит путаницу и противоречит понятию функции риска — $h(x)$. В теории вероятности она определена как отношение функции плотности вероятности — $f(x)$ к функции выживания — $S(x)$ в точке x. При экспоненциальном распределении ее значение равно интенсивности события — λ_A,т. е. в данном случае — интенсивности возникновения пожара[69,70,71]:

$$h(t_П) = \frac{f(t)}{S(t)} = \frac{\lambda_П \exp(-\lambda_П \cdot t_{ПБР})}{\exp(-\lambda_П \cdot t_{ПБР})} = \lambda_П. \tag{26}$$

Вторую ошибку целесообразно устранить с помощью вероятностно-физической модели, полученной в виде логнормальных функций распределения. Речь идет о дополнительном тепловыделении каждого элемента при пожароопасном отказе:

$$F_e(Q) = 1 - v_e[1 - G_e(z)], \tag{27}$$

---

[61] Белозеров В. В. Автоматизированная система испытаний материалов электротехнической и радиоэлектронной промышленности с контролем их пожарной опасности.
[62] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[63] Белозеров В. В. О целесообразности пересмотра основных «пожарных» стандартов.
[64] ГОСТ Р 27.403-2009 Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы.
[65] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[66] Белозеров В. В. О целесообразности пересмотра основных «пожарных» стандартов.
[67] ГОСТ Р 27.403-2009 Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы.
[68] Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
[69] Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
[70] Белозеров В. В. О целесообразности пересмотра основных «пожарных» стандартов.
[71] ГОСТ Р 27.403-2009 Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы.

где $F_e(Q)$ — вероятность дополнительного тепловыделения; v_e — доля пожароопасных отказов (короткое замыкание, пробой, обрыв); $G_e(Z)$ — условная функция распределения (при возникновении пожароопасного отказа элемента) случайной величины $Z = \lg Q$, в которой $Q = k \cdot U \cdot I \cdot t$ — Джоулево тепло пожароопасного отказа элемента.

В этом случае при переходе процессов деструкции и пиролиза в самоускоряющуюся фазу по критериям Семенова и Франк-Каменецкого тепловыделение пожароопасного отказа приводит к нагреву и самовоспламенению материала отказавшего ЭРЭ. Возможен и другой сценарий. Тепловыделение пожароопасного отказа «зажигает» соседний ЭРЭ по критерию Зельдовича и Любченко — Марченко. Так происходит, если плотность теплового потока равна критической для «соседа» и температура его поверхности достигает температуры воспламенения.

Интенсивности отказов ЭРЭ необходимо определять по модифицированному уравнению Аррениуса — Эйринга[72,73]:

$$\lambda = A\left(P,V,N,F\right)\frac{\mathrm{k}T\cdot}{h}\cdot\exp\cdot\left(-\frac{E_a}{\mathrm{k}T}\right)\cdot\exp\cdot\left[f\left(H\right)\right], \tag{28}$$

где λ — текущая интенсивность отказа ЭРЭ; $A = k_i \cdot \lambda_n$ —произведение коэффициентов, зависящих от давления, влажности, вибраций и т. д., а также номинальной интенсивности отказов ЭРЭ (λ_n); k— постоянная Больцмана; T— температура ЭРЭ; h— постоянная Планка; E_a— эффективная энергия активации отказа ЭРЭ; $f(H)$ — функция нетермической (энергетической) нагрузки ЭРЭ.

Уравнение Аррениуса — Эйринга (28) должно решаться для каждого ЭРЭ в изделии с помощью термозондирования внутреннего объема изделия $[T(t)]$ и окружающего воздуха $[T_A(t)]$ при одновременном измерении потребляемой изделием энергии $[E(t)]$ путем решения уравнений теплового баланса (прямая и обратная задачи тепловой локации) Навье — Стокса. В результате определяются температуры (Т) и текущие значения функций энергетических нагрузок каждого ЭРЭ$[f_i(H)]$, а значения функций энергии активации отказов каждого ЭРЭ выбирается на «сглаженных поверхностях» функций $[E_a(H,T)]$, получаемых при решении уравнения (28) по трем справочным значениям интенсивностей отказов — хранения, номинального и предельно допустимого[74].

В этом случае можно определить интенсивности пожароопасных отказов ЭРЭ ($\lambda_{fh} = \lambda_{H,T} \cdot v_e$) и интенсивности их воспламенений ($\lambda_{ign} = \lambda_{fh} \cdot F_e$), т. к. известны критические тепловые параметры для каждого ЭРЭ. Далее интегрированием можно вычислить вероятности воспламенений ЭРЭ (F_{ign}), что позволит устранить методологическую и логическую незавершенность оценки пожарной опасности любого изделия или объекта. После чего, добавляя жаропроизводительность горения воспламенившегося ЭРЭ к критическим тепловым параметрам окружающих его ЭРЭ, можно вычислить распространение огня по тем же критическим параметрам, что и позволит определить вероятность пожара в изделии[75].

Аналогично применяя выражения для энтропии и энергии (18), (19), уравнение Аррениуса — Эйринга можно использовать в энтропийном виде:

$$\lambda = A\left(P,V,N,F\right)\frac{\mathrm{k}T\cdot}{h}\cdot\exp\cdot\left(-\frac{S_O}{\mathrm{k}}\right)\cdot\exp\cdot\left[f\left(H\right)\right], \tag{29}$$

где S_O— энтропия отказа электрорадиоэлемента. Остальные обозначения см. в (28).

Выводы. Анализ основных «пожарных» стандартов и норм выявил их несоответствие современному состоянию науки и техники. Отмечено, что фундаментальная наука уделяет недостаточно внимания «пожарным проблемам», которые являются прикладными задачами теории горения и взрыва, физической химии, теплофизики и термодинамики.

Представлены результаты системного синтеза основных подходов в теории горения (воспламенения и зажигания) и методов и средств термического и акустикоэмиссионного анализа. Таким образом реализован вероятностно-физический метод определения горючести и пожарной опасности веществ, материалов,

---

72 Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.
73 Белозеров В. В. О целесообразности пересмотра основных «пожарных» стандартов.
74 Белозеров В. В. О целесообразности пересмотра основных «пожарных» стандартов.
75 Белозеров В. В. Методы, модели и средства автоматизации управления техносферной безопасностью.

электроприборов и предметов быта. Это позволит обеспечить требуемый уровень защиты населения и объектов техносферы от пожаров.

Предложен энтропийный подход к диагностике безопасности и надежности техногенных и природных систем, в периметре которых находятся люди. В этом случае минимально допустимый уровень безопасности — 0,999999.

Приведены результаты доработки недостатков и ошибок в стандартах и нормах пожарной безопасности, которые возникли из-за «отраслевого» подхода к их разработке и должны быть исправлены.

Библиографический список

1. Э. Р. Дж. Эккерт. Проблема пожаров в США // Теплопередача при пожаре / под. ред. П. Блэнкшира. — Москва : Стройиздат, 1981. — С.7–18.

2. Белозеров, В. В. Ретропрогноз пожаров и последствий от них как метод оценки эффективности инноваций в области пожарной безопасности / В. В. Белозеров, С. Н. Олейников // Вопросы безопасности. — 2017. — № 5. — С. 55–70. 10.25136/2409-7543.2017.5.20698

3. Махутов, Н. А. Системные стратегические риски и приоритеты прогнозного социально-экономического и научно-технического развития до 2030 года / Н. А. Махутов, Б. Н. Кузык, Н. В. Абросимов. — Москва : ИНЭС РАН ; ИМАШ РАН, 2012. — 78 с.

4. Классификация объектов повышенной опасности и вероятностно-физические модели их устойчивости и безопасности / В. В. Белозеров, С. Л. Загускин, Ю. В. Прус [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. — 2001. — № 8. — С. 34–40.

5. Адаптивные системы подавления энтропии в техносфере / В. В. Белозеров, Е. И. Богуславский, В. В. Пащинская, Ю. В. Прус // Успехи современного естествознания. — 2006. — № 11. — С. 59–62.

6. К вопросу о диагностике «человеческого фактора» / В. В. Белозеров, В. М. Гаврилей, В. И. Климкин, М. М. Любимов // Глобальная безопасность. — 2012. — № 1. — С. 120–125.

7. Прус, Ю. В. О стабильной акустоэмиссионной характеристике степени поврежденности квазихрупких материалов / Ю. В. Прус // Известия вузов. Физика. — 1994. — Т. 37, № 4. — С. 62–67.

8. Буйло, С. И Совмещенная термогравиметрическая и акустико-эмиссионная диагностика стадий термодеструкции веществ и материалов / С. И. Буйло, В. В. Белозеров, Ю. В. Прус // Дефектоскопия. — 2008. — № 3. — С. 71–75.

9. Семенов, Н. Н. Тепловая теория горения и взрывов / Н. Н. Семенов // Успехи физических наук. — 1940. — Т. 23, № 3. — С. 251–292.

10. Киселев, Я. С. Физические модели горения в системе пожарной безопасности / Я. С. Киселев, О. А. Хорошилов, Ф. В. Демехин. — Санкт-Петербург : СПб ун-т ГПС МЧС России, 2009. — 339 с.

11. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. — Москва : Наука, 1987. — 492 с.

12. Барзыкин, В. В. Исследование теплового взрыва конденсированных систем в условиях слабого теплообмена с окружающей средой / В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов // Журнал физической химии. — 1964. — Т. 38, № 11. — С. 2640–2646.

13. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. — Москва : Наука, 1980. — 479 с.

14. Ковальский, А. А. К вопросу о зажигании баллиститных порохов / А. А. Ковальский, С. С. Хлевной, В. В. Михеев // Физика горения и взрыва. — 1967. — Т. 3, № 4. — С. 527–541.

15. Аверсон, А. Э. Приближенный метод решения задач тепловой теории зажигания / А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов // Доклады АН СССР. — 1968. — Т. 178, № 1. — С. 131–134.

16. Любченко, И. С. Тепловая теория зажигания реагирующих конденсированных веществ / И. С. Любченко, Г. Н. Марченко // Успехи химии. — 1987. — № 2. — С. 216–240.

17. Любченко, И. С. Зажигание конденсированных веществ различной геометрии конвективным тепловым потоком / И. С. Любченко, В. И. Любченко, В. В. Матвеев // Журнал физической химии. — 1982. — Т. 56, № 2. — С. 2959–2964.

18. Нанотехнологии испытаний и диагностики материалов, конструкций и элементов инженерных систем зданий с огнезащитными покрытиями. Ч. 1 / В. В. Белозеров, А. И. Голубов, И. Е. Кальченко [и др]. // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. — 2020. — Т. 12, № 3. — С. 174–184. 10.15828/2075-8545-2020-12-3-174-184

19. Лобановский, М. Г. Основания физики природы / М. Г. Лобановский. — Москва : Высшая школа, 1990. — 262 с.

Поступила в редакцию 25.09.2021
Поступила после рецензирования 18.10.2021
Принята к публикации 19.10.2021

Об авторе:

Белозеров Валерий Владимирович, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6999-7804, safeting@mail.ru